

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Ústav letecké dopravy

Antikorózní úpravy povrchů leteckých konstrukcí

Anti-corrosion Surface Treatment of Aircraft Structures

Student:

Martina Tomčalová

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Petr Kolarczyk

Ostrava 2012

Obsah

Cíl bakalářské práce	4
Úvod	5
1. Teorie koroze.....	6
1.1 Typy koroze	6
1.2 Koroze a její mechanické faktory	12
1.3 Účinky koroze na kovy a jejich slitiny	16
1.4 Korozní prostředí	21
2. Výskyt, odstraňování a ošetřování koroze	26
2.1 Inspekce koroze.....	26
2.2 Oblasti náchylné ke korozi	27
2.3 Korozní poškození a obráběcí limity	30
2.4 Praktiky ošetřování koroze	31
3. Preventivní postupy a úpravy materiálů	33
3.1 Faktory regulování koroze.....	33
3.2 Předběžné úpravy povrchu	34
3.3 Plátování	35
3.4 Kovové povlaky	35
3.5 Konverzní povlaky	36
3.6 Korozi-preventivní sloučeniny.....	36
4. Analýza výskytu koroze.....	37
5. Postupy při nálezu koroze	39
6. Investice do antikorozního vybavení	40
Zhodnocení cíle bakalářské práce	44
Závěr	45
Použitá literatura	

Cíl bakalářské práce

Cílem této bakalářské práce je přehledně představit problematiku koroze v letectví se zahrnutím také praktického pojetí a představit doporučení pro konkrétní leteckou údržbovou společnost.

Úvod

Koroze je problém, se kterým se lidstvo utkává již po mnoho let, ale její skutečná podstata, to že se jedná o elektrochemický proces, byla přijata teprve na počátku dvacátého století. S příchodem letectví, jeho rozvojem a používáním kovových slitin vznikla i potřeba chránit drahá letadla a lidské životy před jejími důsledky. Jedním z hlavních milníků, který jako jeden z prvních představil skutečná rizika koroze v dopravním letectví, byl incident letu 243 aerolinek Aloha Airlines v roce 1988. Navzdory tomu, že byla zcela odtržena velká část stropního trupu v přední části letadla, posádce se přesto podařilo přistát s pouze jedním zraněním z devadesáti cestujících. Příčinou této nehody byla štěrbinová koroze.

I když se nové materiály neustále vyrábějí a povrchové úpravy jsou na vysoké úrovni, stupňovaná agresivita provozního prostředí jejich efektivitu snižuje. Koroze navíc zaujímá mnoho podob a odolnost letadel je znatelně ovlivněna i jen malými změnami okolního prostředí.

Pro její správné ošetření je potřeba znát její charakter a příčiny. Teoretické a praktické znalosti nám umožňují minimalizovat korozní účinky a v některých případech zajistit i prevenci.

Tato práce představuje problematiku koroze v letectví a její řešení. Jsou v ní uvedeny i případy z praxe ve spolupráci s firmou JOB AIR Technic, postupy údržby, a doporučení autorky pro zefektnění antikorozní úpravy povrchů.

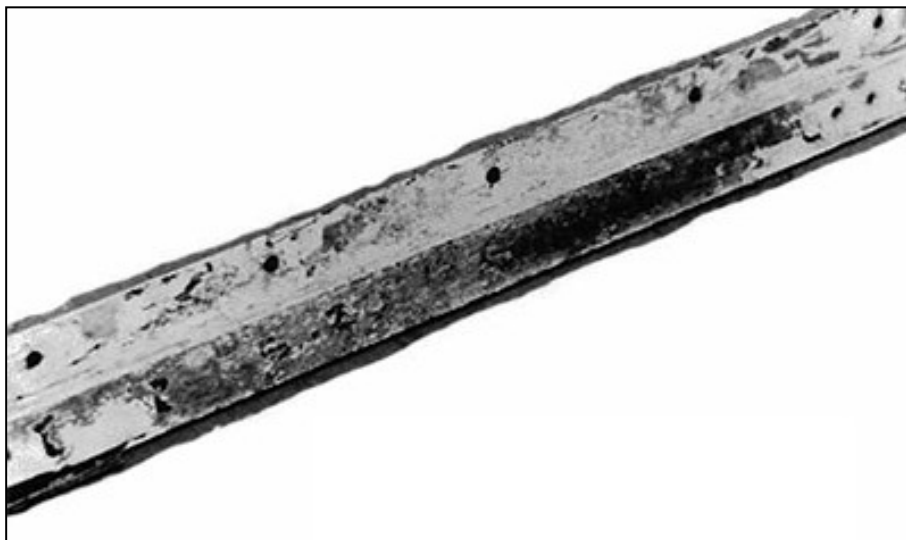
1. Teorie koroze

1.1 Typy koroze

Terminologie používaná při popisu koroze je založena buď na vzhledu koroze, nebo mechanismu jejího tvoření. Častokrát se ale projevuje několik typů koroze najednou, tak bývá složité zjistit přesnou příčinu.

Rovnoměrná koroze

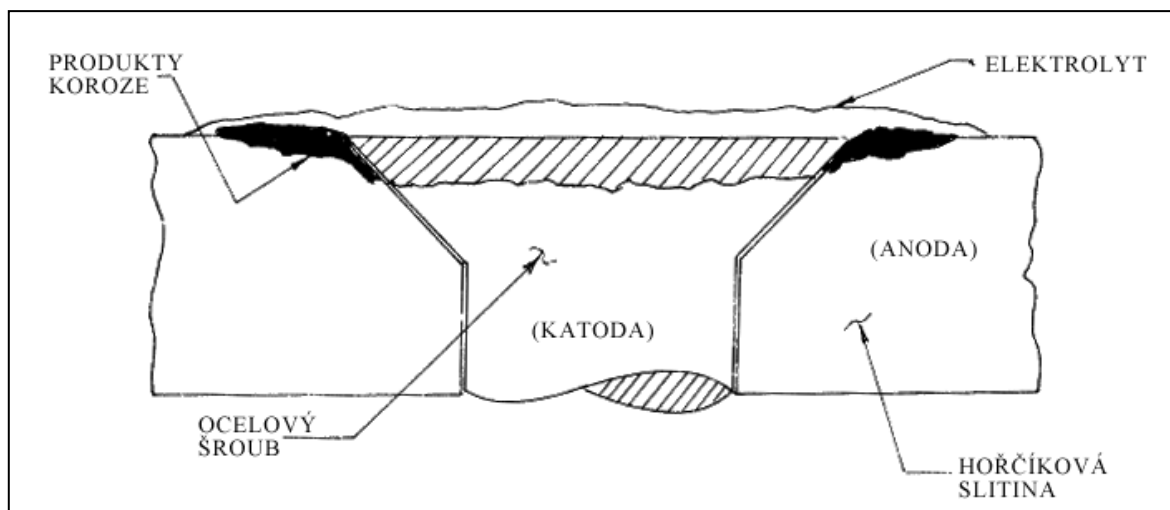
Je příčinou přímé chemické koroze na kovových površích. Na vyleštěném povrchu se poprvé projevuje ztrátou lesku nebo leptáním, a pokud nedojde k jejímu odstranění, povrch zdrsňuje a může se zdát jako zamrzlý (viz *Obr. 1*). Tato koroze se vyskytuje po celém povrchu, jelikož anody a katody jsou velmi malé a neustále se posunují. Příkladem je leptání kovů kyselinami.



Obr. 1 - Rovnoměrná koroze

Galvanická koroze

Nastane, pokud jsou různé kovy ve styku navzájem, ale i s elektrolytem (například slanou vodou). Většinou se pozná podle nahromaděné koroze v místě styku kovů, jak je vidět na *Obr. 2*. Například panely hliníkového potahu a zdvojovače z nerezové oceli snýtované k sobě na konstrukci letadla tvoří galvanický pár, pokud je přítomna vlhkost nebo znečištění.



Obr. 2 - Galvanická koroze

Koroze koncentračních článků

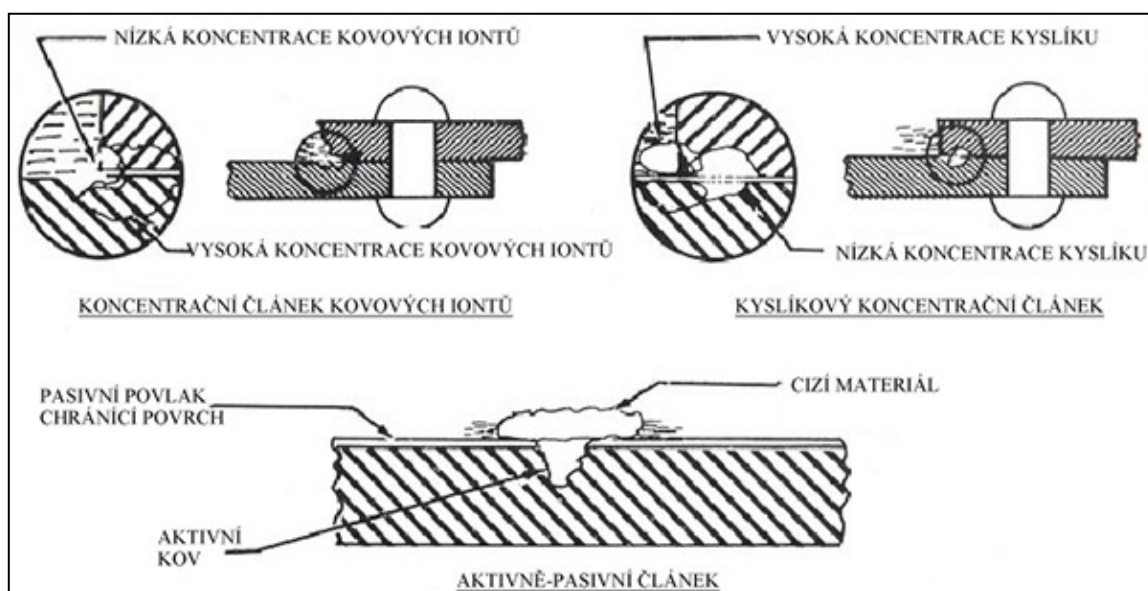
Jedná se o korozi kovů v kovových spojích, korozi na okraji spojů, i když jsou spojované kovy identické, nebo korozi jednoho místa na povrchu kovu pokrytém cizím materiálem. Tomuto druhu koroze se také může říkat štěrbinová koroze. Tři základní typy koroze koncentračních článků jsou: koroze kovových iontových koncentračních článků, kyslíkových koncentračních článků a aktivně-pasivních článků. Jejich přehled je zobrazen na Obr. 3.

U koncentračních článků kovových iontů může roztok tvořit voda a ionty kovu, který je v kontaktu s vodou. Vysoká koncentrace kovových iontů se běžně vyskytuje pod těsně přiléhajícími povrchy, kde je roztok stojatý, a nízká koncentrace kovových iontů se vyskytuje blízko u štěrbin, která je na přiléhavém povrchu. Elektrický potenciál se nachází mezi dvěma body: oblast kovu, která je v kontaktu s nízkou koncentrací kovových iontů, bude anodická a zkoroduje, kdežto místo kontaktu s vysokou koncentrací kovových iontů bude katodické a nebude vykazovat žádné známky koroze.

U kyslíkových koncentračních článků roztok v kontaktu s kovovým povrchem běžně obsahuje rozpuštěný kyslík. Kyslíkový článek se může vytvořit kdykoli není kyslíku ve vzduchu umožněno rozpouštět se do roztoku, čímž se vytvoří rozdíl v koncentraci kyslíku mezi dvěma body. Typická místa výskytu kyslíkových koncentračních článků jsou pod kovovými nebo nekovovými usazeninami na kovovém povrchu a pod přiléhavými povrchy, jako jsou snýtované přeplátované spoje. Kyslíkové články se také mohou vytvořit pod těsněními, dřevem, gumou nebo jinými materiály v kontaktu s kovovým povrchem.

Koroze pak vzniká v oblastech nízké koncentrace kyslíku (anoda). Slitiny, jako je nerezová ocel, které jsou korozi odolné díky pasivitě svého povrchu, jsou obzvláště náchylné ke štěrbinové korozi.

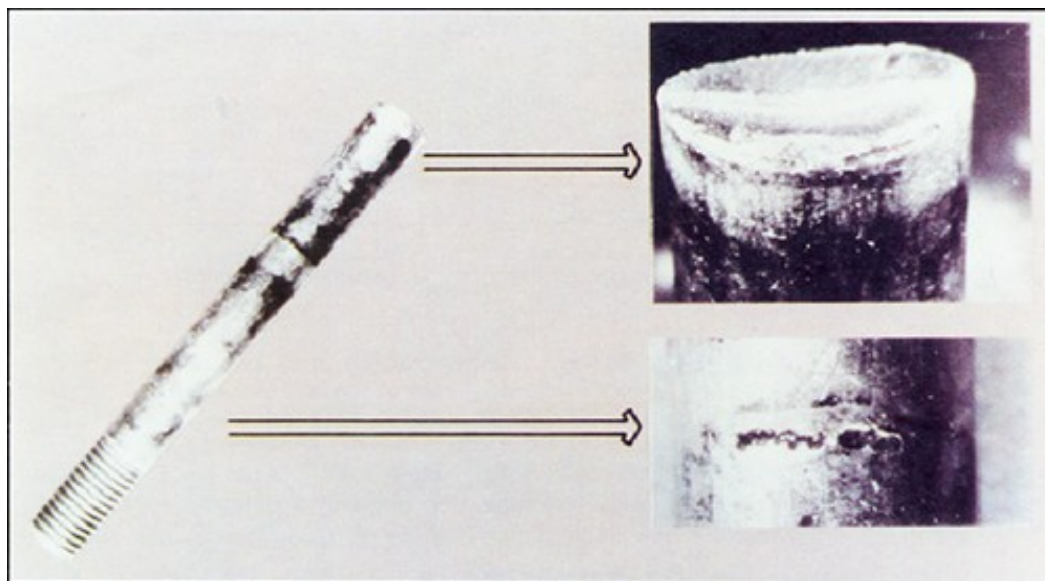
Posledním typem jsou aktivně-pasivní články. Kovy, které závisí na těsně přiléhavém pasivním filmu, většinou se jedná o kyslík pro ochranu proti korozi, jako je odolná ocel, jsou náchylné k rychlému korozivnímu napadení aktivně-pasivními články. Jako příklad mohou být usazeniny soli na kovovém povrchu v přítomnosti vody obsahující kyslík, které mohou vytvořit kyslíkový článek. Pasivní vrstva se prolomí pod částicemi nečistoty. Když je pasivní film prolomen, aktivní kov pod ním je vystaven korozivnímu napadení. Mezi velkou plochou katody (pasivní vrstvou) a malou plochou anody (aktivním kovem) vznikne elektrický potenciál. Aktivní kov poté může být rychle napaden důlkovou korozi.



Obr. 3 - Koroze koncentračních článků

Důlková koroze

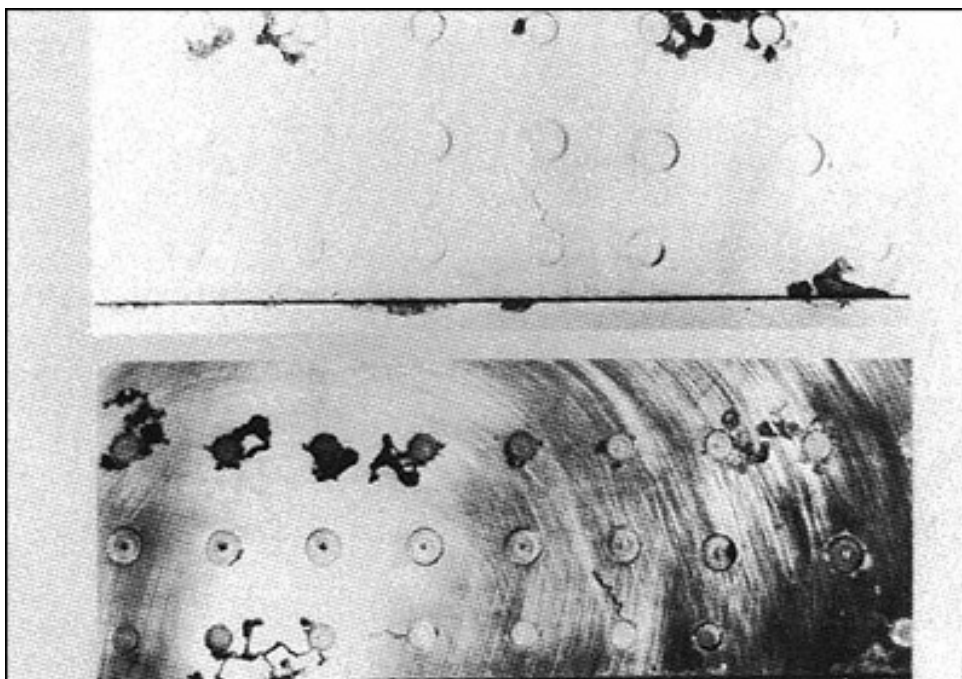
Nejběžnějším typem koroze slitin hliníku a hořčíku je důlková koroze. Ze začátku je zřetelná jako bílá nebo šedá prášková usazenina podobná prachu, která poskvíní povrch (viz Obr. 4). Když je usazenina odstraněna, na povrchu jsou být patrné malé důlky nebo díry. Důlková koroze se ale může vyskytnout i u jiných druhů kovových slitin. Kombinace malých aktivních anod a velkých pasivních katod způsobuje prudkou korozi. Toto pravidlo také platí u kovů, které byly pasivovány chemickým čištěním, a také u těch, které si vytvoří pasivaci díky podmínkám okolního prostředí.



Obr. 4 - Důlková koroze

Vláknitá koroze

Tato koroze je speciální forma koroze kyslíkového koncentračního článku nebo štěrbinové koroze, která se vyskytuje na kovových površích s organickou úpravou povrchu. Je rozpoznatelná podle své charakteristické stopy pod nátěrem, připomínající červí cestičky, jak je vidět na *Obr. 5*. Vláknitá koroze nastává při relativní vlhkosti vzduchu mezi 78 a 90%, a když je povrch lehce kyselý. Začíná na místech přerušení ochranného povlaku, jako jsou škrábance a praskliny kolem spojovacích prvků a spár, a pokračuje pod povlakem kvůli difuzi vodních par a kyslíku ze vzduchu skrze tento povlak. Vláknitá koroze může nastat u povrchů oceli, hořčíku a hliníku. Stopy u oceli nepronikají skrz, ale u hliníku mohou jít i do hloubky. Pokud není vláknitá koroze odstraněna, oblast ošetřena a opatřena ochrannými nátěry, může vést i k mezikrystalické korozi, zejména v již zmíněných místech spojovacích prvků a spár. Vláknitá koroze může být odstraněna zrnitým materiálem pro otryskávání s příslušným náčiním nebo mechanickým leštěním a pískováním. Může se jí předejít skladováním náčiní a letadla v prostředí s relativní vlhkostí pod 70%, použitím povlaku s nízkým poměrem difuze u kyslíku a vodních par, udržováním povlaku v dobrém stavu a umýváním vybavení i samotného letadla kvůli odstranění kyselých kontaminantů z povrchu (jako znečištění z ovzduší). Pokud dojde k poškození nátěru, je třeba na toto místo použít protikorozi směsi.



Obr. 5 - Vlákniťá koroze před a po odstranění nátěru

Mezikrystalická koroze

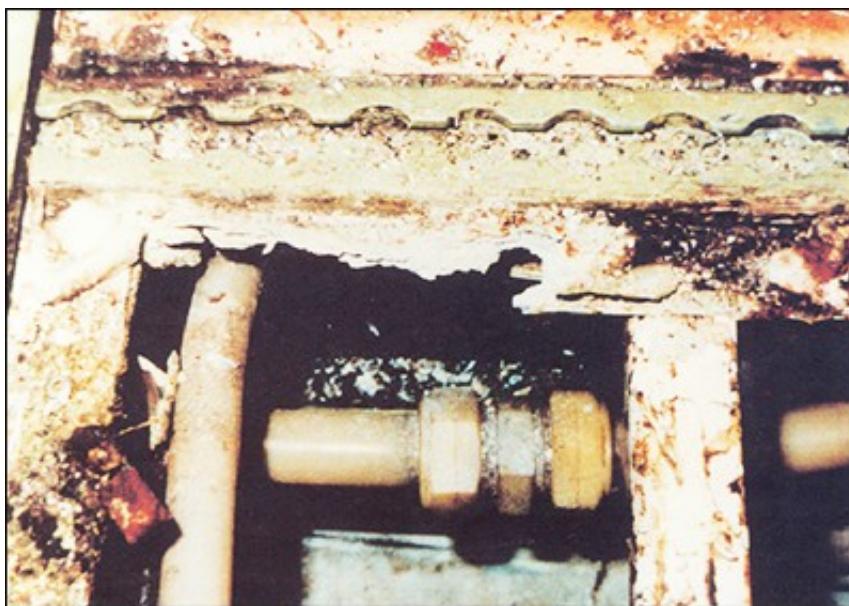
Mezikrystalická koroze vzniká na hranicích částic kovů. Vysoce zvětšený pohled na průřez kterýmkoli komerčním kovem ukazuje zrnitou strukturu kovu. Skládá se z množství samostatných zrn, která mají každé svou hranici, jenž se chemicky odlišuje od kovu v samotném zrnku. Tyto rozhraní jsou často anodické (mají větší náchylnost ke korozi) ve srovnání s kovem vevnitř. Pokud se dostanou do kontaktu s elektrolytem, rychle se na těchto hranicích začne tvořit koroze (*Obr. 6*).



Obr. 6 - Mezikrystalická koroze

Oprýskávání

Neboli exfoliace, je pokročilá forma mezikrystalické koroze, kde jsou povrchové kovové částice nadzvednuty silou rozrůstající-se koroze na jejich hranicích. Právě nadzvedávání nebo zduření materiálu je důkaz koroze oprýskáváním (viz Obr 7). Projevuje se na vytlačovaných, stočených, zkroucených a kovaných hořčíkových nebo vysokopevnostních hliníkových částech.



Obr. 7 - Vážný případ oprýskávání nalezen pod sedadly

Mikrobiologická koroze

Na vlhkých površích mohou vyrůstat plísňové, houbové, slizové a jiné živé organismy (některé i mikroskopické). Když se uchytí, oblast většinou zůstává vlhká a zvyšuje riziko další koroze. Jejich přítomnost může způsobit, že jsou v jejich blízkosti různé koncentrace kyslíku a elektrolytu. Navíc mohou tyto organismy vylučovat korozivní odpadní hmoty, které korozi samy způsobují. Tento typ koroze může nastat v integrálních palivových nádržích, což je způsobeno přítomností bakterií v palivu nebo nádrži samotné (jak je patrné na Obr. 8). Plísně rostou na rozhraní paliva a vody, a vytvořené metabolické produkty korodují kovové konstrukce.



Obr. 8 - Mikrobiologická koroze v nádrži

Koroze způsobená rtutí na slitinách hliníku

Rtuť rozlitá na hliníku by se měla okamžitě vyčistit, jelikož způsobuje korozi, která má důlkový i mezikrystalický charakter a je velice složité ji regulovat. Nejvíce devastujícím účinkem rozlití rtuti na hliníkové slitiny je tvorba amalgámu, který se rychle šíří podél rozhraní zrn a vyvolává takzvané zkřehnutí způsobené roztaveným kovem. Pokud je slitina hliníku pod tahovým napětím, toto zkřehnutí způsobí rozštěpení, které je vzhledově podobné těžkému oprýskávání. Efektivní metodou vyhledávání malých částic rozlité rtuti může být rentgenová prohlídka, protože hustá rtuť se jasně objeví na rentgenových snímcích.

1.2 Koroze a její mechanické faktory

Korozivní napadení jsou často způsobena mechanickými faktory, které jsou buď uvnitř části (residuální) nebo na ni působí z vnějšku (cyklické provozní zatížení). Eroze pískem nebo deštěm a mechanické opotřebení postupně odstraňuje povrchové ochranné vrstvy a přispívá ke vzniku koroze vespod ležících kovových vrstev. Koroze, která je podporována některými mechanickými faktory většinou způsobí degeneraci části daleko rychleji než samotný výskyt koroze. Podmínky prostředí a složení slitiny také ovlivňuje rozsah koroze. Příklady tohoto spojení vlivů jsou koroze za napětí, únavová koroze a koroze třením.

Koroze za napětí

Koroze za napětí je mezikrystalické praskání kovu, které je způsobeno kombinací napětí a koroze (*Obr. 9*). Napětí může být způsobeno vnějším nebo vnitřním zatížením. Vnitřní napětí může být vyvoláno nerovnoměrnou deformací při obrábění za studena, nestejným chlazením z vysokých teplot a změnami vnitřní struktury, zahrnujícími

objemové změny. Vnitřní napětí jsou vyvolána, když je část struktury deformována během montáže (např. během zatlačování do objímek, přinýtování, šroubování, ohýbání pro zapasování, atd.). Skryté napětí je důležitější než napětí konstrukční, jelikož je koroze za napětí těžko poznatelná předtím, než byl překročen bezpečnostní konstrukční činitel. Úroveň napětí se liší v různých místech v kovu. Pro vyvolání koroze za napětí jsou většinou zapotřebí napětí blízká se prahovým hodnotám, ale k poškození může dojít i za nižších napětí. Byly identifikovány zvláštní prostředí, které tuto korozi způsobují u určitých slitin. Solné roztoky a mořská voda mohou způsobit korozi za napětí u vysokopevnostních tepelně opracovaných ocelí a hliníkových slitin. Metyl alkohol-chlorovodíkové kyselinové roztoky tuto korozi způsobují u některých titanových slitin. Slitiny hořčíku mohou korodovat ve vlhkém vzduchu. Výskyt koroze za napětí může být snížen aplikováním ochranných povlaků, tepelnou úpravou vyrovnávání napětí, použitím korozních inhibitorů nebo regulováním prostředí. Kuličkováním kovového povrchu je možné zvýšit odolnost vůči této korozi tak, že se vytvoří kompresní napětí na povrchu, která se překonají tím, že se podrobí tahovému napětí předtím, než se začne povrch zatěžovat. Tímto se práh napětí zvyšuje.



Obr. 9 - Koroze za napětí

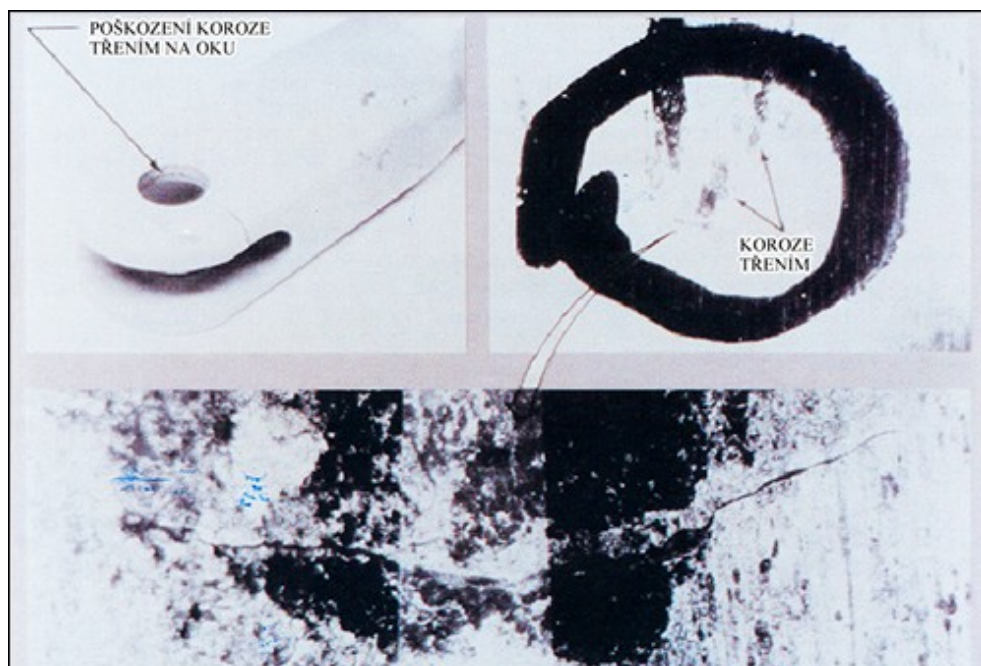
Únavová koroze

Únavová koroze je způsobena společnými účinky střídavého namáhání a koroze. Žádný kov není zcela imunní vůči snížení své odolnosti proti střídavému namáhání v korozivním prostředí. Škody z únavové koroze jsou větší, než součet škod ze střídavého

namáhání a koroze samostatné. Selhání ve formě únavové koroze nastává ve dvou stádiích. Během prvního stádia kov poškozují společné účinky koroze a střídavého namáhání, ty způsobují důlkovou korozi a tvorbu trhlin do takového stupně, že lomy v důsledku střídavého namáhání nakonec nastanou, a to i po kompletním odstranění korozivního prostředí. Druhé stádium je v podstatě únavová fáze, ve které selhání pokračuje rozšiřováním trhliny (často z korozivních důlků) a je řízeno zejména efekty koncentrací napětí a fyzickými vlastnostmi kovu. Praskání kovových částí, kvůli únavové korozi, obvykle nastává při úrovni napětí daleko pod únavovým limitem za laboratorních podmínek, i když je množství koroze relativně malé. Z tohoto důvodu je ochrana všech částí vystaveným střídavému namáhání mimořádně důležitá, i v prostředích, které jsou jen lehce korozivní.

Koroze třením

Je to zvláštní forma koncentračního korozního článku, která nastává v kombinaci s povrchovým opotřebením. Produkty koroze zvyšují opotřebování povrchu a opotřebení odhaluje nechráněný kovový povrch další korozi. Celkový dopad je větší, než jednotlivý účinek koroze a opotřebení zvlášť. Jejich kombinace se jeví jako odírání, při kterém jsou z povrchu odtrhávány kusy kovu s korozi na těchto poškozených místech nebo v drsných důlcích. Tento typ koroze nastává na přiléhajících površích blízké tolerance a na částech pod vysokým tlakem v korozivním prostředí, kde je malý relativní pohyb částí, jako bývá například pohyb způsoben vibracemi. S korozí třením je možno se setkat u vysoce zatížených statických spojů, které podléhají vibracím a nemohou být, nebo nejsou, utěsněny kvůli prevenci vniku vlhkosti. To mohou být třeba oblasti připevnění komponentů podvozku a objímkami, které mají nízkou toleranci, se západkami, které jimi prochází (viz *Obr. 10*).



Obr. 10 - Koroze třením

Tepelné zpracování

Tepelné opracování materiálů draku letounu by se mělo přísně kontrolovat, aby se uchovala odolnost proti korozi, stejně jako vylepšily jejich základní mechanické vlastnosti. Nesprávné tepelné zpracování plátované slitiny hliníku může například způsobit, že se plátování vystaví nadměrné difuzi, protože je tepelné zpracování roztokem příliš dlouhé nebo za moc vysoké teploty. Toto sníží inherentní odolnost samotného plátování a jeho schopnost poskytnout ochranu vnitřní slitiny hliníku. Hliníkové slitiny, které obsahují znatelné množství mědi a zinku jsou vysoce náchylné k mezikrystalické korozi, pokud se během tepelného zpracování nebo jiného zvláštního ošetření prudce nezchladí. Slitiny nerezové oceli jsou náchylné ke karbidové přecitlivělosti, když jsou chlazeny po svařování nebo vysokoteplotním opracování. Pro snížení zbytkového napětí je běžně doporučeno provést tepelné zpracování po svařování.

Vodíkové zkřehnutí

Porušení způsobené okolním prostředím může často být výsledkem vodíkového poškození, spíše než oxidací. Atomy vodíku jsou katodické produkty mnoha elektrochemických reakcí, tvořících se během přirozeně se vyskytujících korozních reakcí a během mnoha procesů plátování nebo moření. Jestli je vodík uvolňován jako plyn nebo

je jeho atomová forma absorbována kovem, záleží na povrchovém chemickém složení kovu.

Atomový vodík má kvůli svým malým rozměrům a hmotnosti vysokou difuzivitu ve většině kovů. Proto snadno pronikne většinou čistých kovových povrchů a rychle se přesunuje do příznivých míst, kde může zůstat v roztoku, srážet se jako molekulový vodík a vytvořit dutiny se zvýšeným tlakem, praskliny nebo velké puchýřky. Také může reagovat se základovým kovem nebo se slitinovými částecemi z hydridů.

Nahromadění vodíku ve vysokopevnostních slitinách nezřídka vede k praskání, a k tomu často dochází ve staticky zatížených komponentech několik hodin, nebo i dní, po počátečním zatížení nebo vystavení zdroji vodíku. Praskání tohoto typu se většinou říká vodíkové praskání za napětí, opožděné vodíkové praskání nebo vodíkem vyvolané praskání. Podobné procesy lámání můžou nastat v nových a nepoužívaných částech, kde tepelné zpracování nebo obrábění v těchto částech zanechalo zbytková napětí, a které poté byly vystaveny zdroji vodíku. Z tohoto důvodu musí být všechny procesy (jako moření nebo elektroplátování) vykonávány za dobře řízených podmínek pro minimalizaci množství vytvořeného vodíku.

1.3 Účinky koroze na kovy a jejich slitiny

U různých kovů a slitin se koroze projevuje jinak, takže se její identifikace odlišuje. Na letadlech se vyskytují zejména následující materiály (hrubý přehled viz *Tabulka 1*):

Slitiny hořčíku

Hořčíkové slitiny jsou ty nelehčí kovy používané na letadle. Výskyt koroze u těchto slitin se může výrazně snížit použitím správné konečné povrchové úpravy, jako hořčíkových konverzních povlaků a barvy. Nátěry tohoto typu jsou hustější, než ty naneseny ponořením nebo štětcem na konverzní povlak. Anodizované povrchové úpravy není možno obnovit v běžném provozu. Také je potřeba zvýšené opatrnosti, aby nedošlo k závažnějšímu odstranění těchto povlaků.

Tyto slitiny jsou výrazně náchylné ke korozi, která má podobu bílých prášných hrudek nebo skvrn, pokud je povrch kovu vystaven vnějšímu prostředí bez ochranné povrchové úpravy. Běžný povlak oxidů uhlíku tvořící se na slitinách hořčíku neposkytuje dostatečnou ochranu proti korozi ani v nejmírnějších prostředích. Navíc se výskyt koroze

u hořčkových slitin urychluje, když je slitina ponořená do vody nebo často vystavena vlhkosti. Koroze může také být urychlena rozdílnými vazbami kovů, a když jsou ve vodě rozpuštěny vodivé kontaminanty.

Slitiny hliníku

Hliník a jeho slitiny jsou nejvíce používané materiály na letadlových konstrukcích. Hliník je vysoce anodický, jak je zřejmé z jeho umístění v galvanické tabulce. Přesto ale jeho těsně dosedající oxidová vrstva poskytuje zvýšenou odolnost při mírných korozivních podmínkách. Proto je důležité čistit a ochraňovat hliník a jeho slitiny před korozi. Protože čistý hliník je více odolný proti korozi, než většina slitin, jeho pláty jsou často pokryty tenkou vrstvou téměř čistého hliníku zvaném cladding nebo alclad (duralumin). Ten se ale snadno odstraní hrubým zacházením s brusným papírem a náradím, při čemž se vystavuje povrch více náchylný ke korozi. V těchto oblastech jsou chemické konverzní povlaky, nátěry a směsi chránící proti korozi zvláště důležité. Nicméně, v námořním prostředí potřebují všechny hliníkové povrchy ochranu.

Produkt koroze hliníku je bílošedý prášný materiál (oxid nebo hydroxid hliníku), který je možno odstranit leštěním nebo broušením smirkovým papírem. Hliník je anodický k většině jiným kovům, a pokud se s nimi dostane do kontaktu, dochází ke galvanické korozi hliníku. U jeho slitin se vyskytuje důlková koroze, mezikrystalická koroze a mezikrystalické praskání u koroze za napětí. V některých případech jsou korozivní produkty kovu v kontaktu s hliníkem korozivní i pro hliník samotný.

Usazeniny bělavého prášku se také mohou tvořit v místech přerušení ochranného povlaku a mohou se rozšířit pod natřené oblasti, a tím způsobit puchýřkovatění anebo odprýskávání nátěru. Vyboulení materiálu potahu, povytažené nebo vyskočené nýty, jsou často vizuálním příznakem koroze.

Titan

Titan a jeho slitiny zaznamenávají četné využití na letadlech při teplotách do 530°C. Nad tuto teplotu titan snadno absorbuje plyny z okolního vzduchu a stává se křehkým. I při teplotách blízkých se 538°C si titan udržuje svou pevnost a odolnost vůči korozi.

Tyto kovy jsou vysoce rezistentní proti korozi, protože se na jejich povrchu téměř okamžitě po kontaktu se vzduchem vytváří povlak kyslíku, který je extrémně přilnavý k

povrchům, a poskytuje tedy ochrannou bariéru. Toto je shodné se způsobem, jakým si hliník vytváří ochranný kyslíkový film na svém povrchu.

Pokud se titan zahřeje, na povrchu se vytváří různé oxidy s odlišnými barvami. Toto jsou přínosné změny barev a neměly by se odstraňovat.

- Modrý oxidový povlak se vytvoří při teplotách 371°C až 427°C.
- Fialový při teplotách 427°C až 510°C.
- Šedý při teplotách 538°C a výše.

Titan je méně aktivní člen (katodový) z většiny různých kovových párů, ale může výrazně urychlit korozi kovu, ke kterému je vázán. Elektrická izolace mezi titanem a jinými kovy je nezbytná, aby se předešlo galvanické korozi jiných kovů. Je požadována častá inspekce takových oblastí, aby se zabezpečilo, že při poškození izolace nedojde ke vzniku koroze.

Za určitých podmínek mohou chloridy a chlоровaná ředidla způsobit korozi napětím a praskání některých slitin titanu.

Měď

Měď a její slitiny jsou relativně odolné proti korozi, která je většinou omezena pouze na skvrny a zabarvení. Zpravidla nejsou tyto změny ve stavu povrchu nebezpečné a neměly by mít na součást žádný vliv. Díky inherentní odolnosti tohoto kovu jsou ochranné nátěry zřídka požadovány. Při použití spolu s jinými kovy používanými u letadlových konstrukcí, je měď méně aktivní kov a výrazně urychluje korozi ostatních kovů. Toto se obzvláště potvrzuje u spojení mědi a hliníku. Příklady je možno většinou vidět u elektrických komponentů a v oblastech, kde jsou měděné spojovací pásy nebo dráty připevněny k podvozku nebo strukturním komponentům.

Koroze mědi je zřejmá podle nánosu modrých nebo modrozelených produktů koroze na zkorodované části. Zelená patina je pouze tenký povlak tvořen převážně základním síranem měďnatým (modrá skalice), popřípadě hydratovaným uhličitanem měďnatým.

Patina v tenkém dobře přilnavém stavu ve skutečnosti základnímu kovu poskytuje zvýšenou ochranu proti korozi, ale patina v drsném nebo zmrzlém stavu by měla být odstraněna.

Kadmium

Kadmium se používá jako nátěr k ochraně železných částí a vytvoření kompatibilního povrchu, když jsou dotýkající-se části z jiných materiálů. Železné části jsou buď plátované ke zvýšení korozivzdornosti, nebo k vytvoření určitých fyzikálních vlastností na povrchu částí, jako například odolnost proti obroušení a oxidaci za vysokých teplot. Plát kadmia na železe nebo oceli tyto kovy ochraňuje, dokud se neobjeví samotný rez železa.

Koroze na kadmiu se projevuje hnědým až černým mramorováním na povrchu nebo jako bílý práškový materiál. Pokud se na kadmiu objeví mramorování a izolované dutiny nebo praskliny v povlaku, kadmium si stále zanechává svou ochrannou funkci. Jakékoli mechanické odstraňování produktů koroze by se mělo omezit na kovové povrchy, ze kterých bylo kadmium již vyčerpáno.

Slitiny uhlíku a oceli

Slitiny železa se používají při výrobě mnoha komponentů letadla. Tyto slitiny (s výjimkou nerezové oceli) ve vlhkosti lehce korodují, pokud nejsou chráněny. Povrchy jejich struktur nebo sestav jsou běžně natírány nebo elektroplátovány k zabránění koroze.

Koroze oceli je jednoduše rozpoznatelná, jelikož jejím produktem je červená rez. Když železné slitiny korodují, jako první se většinou vytvoří tmavý produkt koroze. Pokud je přítomna vlhkost, tento povlak se přemění na červenou rez, který podporuje další korozi absorpcí vlhkosti ze vzduchu.

Korozi odolné oceli

Jsou to slitiny železa a chromu, ke kterým se v různých množstvích a kombinacích přidávají i další prvky, jako je nikl, síra, molybden, vanad, kobalt, niob, titan a hliník, aby se dosáhlo požadovaných charakteristik. Nerezové oceli jsou daleko odolnější proti běžnému rezivění, chemickým reakcím a oxidaci za vysokých teplot, než běžné oceli, kvůli neviditelné oxidové vrstvě, která se vytváří na povrchu.

Nerezové oceli jsou vysoce náchylné ke štěrbinové korozi a korozi za napětí ve vlhkých, slaných prostředích a mohou způsobit galvanickou korozi téměř jakéhokoli jiného kovu, se kterým přijdou do kontaktu, pokud nejsou řádně odděleny nebo pokryty ochranným povlakem.

Nikl a chrom

Používají se jako ochranné pokovení. Chrom se také používá k poskytnutí hladkého povrchu odolného proti opotřebení. Niklový podkladový nátěr se díky své odolnosti vůči korozi používá zejména v přímořských oblastech. Úroveň odolnosti je závislá na tloušťce povlaku. Oba kovy tvoří souvislé oxidové vrstvy a mohou být dokonale naleštěny bez ztráty svých ochranných vlastností, ani kovu pod nimi.

Chromové povlaky mívají praskliny, pod kterými se vytváří koroze na základovém kovu.

Stříbro, platina a zlato

Tyto kovy nekorodují běžným způsobem, i když stříbro v přítomnosti síry ztrácí lesk. Na stříbře se vytváří hnědý až černý film, a mat na zlatě je velice tenký a projevuje se jako ztmavnutí povrchu.

Kompozity uhlíkových vláken

Jsou to materiály, které tvoří vyztužené vlákna v matrici z organické pryskyřice. V letectví jsou to důležité materiály, kvůli poměru své pevnosti a váhy, a vysoké tuhosti.

Uhlík je nejméně aktivní kov v galvanické tabulce, takže urychlí korozi jakéhokoli kovu na letadle, se kterým je ve styku. Proto je důležitá izolace mezi těmito kompozity a jinými kovy, aby se zabránilo vzniku koroze.

Slitina	Náchylnost ke korozi	Vzhled produktu koroze
Hořčík	Vysoce náchylný k důlkové korozi.	Sněhobílé, prašné hromádky a bílé skvrny na povrchu.
Nízkolegovaná ocel	Povrchová oxidace a mezikrystalická nebo povrchová důlková koroze.	Rudohnědý oxid (rez).
Hliník	Povrchová důlková koroze, oprýskávání při napětíové korozi, únavové praskání a koroze třením.	Bílošedý prášek.

Titan	Vysoce korozi odolný. Opakovaný kontakt se chlorovými rozpouštědly může způsobit degradaci strukturních vlastností kovů za vysokých teplot.	Žádné viditelné produkty koroze za nízkých teplot. Zabarvující povrchové oxidy se vytváří nad 370 °C.
Kadmium	Rovnoměrná povrchová koroze. Používá se jako dočasné plátování pro ochranu ocele.	Od bílého prашného sedimentu po hnědé nebo černé mramorování povrchu.
Nerezová ocel	Štěrbinová koroze, důlková koroze v přímořských oblastech, korozní praskání, mezikrystalická nebo povrchová koroze (podle typu).	Drsný povrch. Někdy rovnoměrná červená nebo hnědá skvrna.
Niklový základ	Má zpravidla dobrou odolnost. Náchylné k důlkové korozi s mořskou vodou.	Zelený práškový sediment.
Měděný základ	Povrchová a mezikrystalická koroze.	Modrý nebo modrozelený práškový sediment.
Chrom (plátování)	Důlková koroze (způsobuje rezivění podkladové oceli, pokud jsou důlky v plátech)	Žádné viditelné produkty koroze. Puchýřkovatění plátů kvůli rzi a nadzvedávání.
Stříbro	Ztratí lesk za přítomnosti síry.	Hnědý až černý film.
Zlato	Vysoce korozi odolné.	Sedimenty způsobují ztmavnutí lesklého povrchu.
Cín	Náchylný k růstu tzv. "vousků".	Produkty mají vzhled vousků.

Tabulka 1 - Koroze materiálů

1.4 Korozní prostředí

Pravděpodobnost výskytu koroze na letadle závisí na více faktorech, jako je poskytnutá ochrana při údržbě, údržba ochranných povlaků po dobu životnosti a prostředí, ve kterém letadlo operuje.

Koroze leteckého vybavení je způsobena jak přírodními, tak člověkem způsobenými prostředím. Přírodní podmínky, které korozi ovlivňují, jsou vlhkost, teplota, slanost ovzduší, ozón, písek, prach, slunečné záření, hmyz, ptáci a mikroorganismy. Člověkem vytvořené podmínky, které taktéž ovlivňují proces koroze, jsou průmyslové znečištění, výrobní postupy, skladovací podmínky a přeprava.

Vlhkost

Vlhkost je ve vzduchu přítomna jako plyn (vodní pára) nebo jako jemné kapičky kapaliny (opar nebo mlha) a často obsahuje kontaminanty, jako jsou chloridy, sulfáty a dusičnany, které účinky koroze zhoršují. Vlhkost vniká do všech oblastí letadla, které jsou přístupny vzduchu. Když klesne teplota vzduchu natolik, že v sobě vzduch nemůže udržet všechnu vlhkost, ta poté zkondenzuje.

Zkondenzovaná vlhkost se většinou s rostoucí teplotou vypaří, ale zanechá za sebou kontaminanty (rezidua), včetně solí. To může způsobit nahromadění špíny a kontaminaci solí. Kondenzovaná vlhkost a její kontaminanty se také mohou zachytit v těsně přiléhavých smáčivých spojích. Vlhkost se v těchto místech může nahromadit během několika následných cyklů oteplování a ochlazování vzduchu. Navíc se vlhkost může nasáknout dále do spojů v důsledku vztlínivosti.

Všechny nekovy nějakou vlhkost absorbují, což může způsobit změny v rozměrové stálosti, dielektrické pevnosti, zapalovacím napětím, a vnitřního odporu izolace. Organické matrice kompozitů jsou všeobecně nepříznivě ovlivněny vlhkostí a po vystavení těmto podmínkám mohou trpět ztrátou pevnosti a tuhosti.

Teplota

Hraniční teploty pro určité vybavení, které je podle nich navrženo, mohou způsobit buď zlepšení, nebo degradaci tohoto vybavení, v závislosti na podmínkách. Některé elektronické vybavení nemusí při vysokých teplotách pracovat správně. Růst plísní a bakterií je ale také potlačen nad teploty 40°C. Nejnižší povolené hraniční teploty zpravidla snižují intenzitu koroze.

Koroze a další škodlivé procesy (jako je degradace nekovových materiálů) se obecně stupňují s rostoucí teplotou, ale v některých případech může mírné zvýšení teploty zabránit korozi díky zamezení kondenzace.

Slané ovzduší

Po rozpuštění ve vodě tvoří částice soli silné elektrolyty. Oceán, který obsahuje 3,5 až 3,9 procent soli je největší zdroj soli na světě. Běžné mořské větrné proudy nesou od jednoho po deset gramů soli na metr krychlový vzduchu. Z toho tedy vyplývá, proč jsou přímořské oblasti vysoce korozivní.

Ozón

Ozón je obzvláště aktivní forma kyslíku, která přirozeně vzniká během bouřek a fotochemickými reakcemi ve smogu. Pokud je ozón absorbován elektrolytickým roztokem v kontaktu s kovy, zvyšuje výskyt koroze. Oxiduje také hodně nekovových materiálů, zejména je pak škodlivý pro některé typy syntetické gumy.

Jiné průmyslové imise

Uhlík (z výfuků spalovacích motorů), dusičnany (ze zemědělských hnojiv), ozón (z elektrických motorů a svařčských prací), oxid siřičitý (z motorových výfuků a komínů lodí) a sulfáty (z automobilových výfuků) jsou významné škodlivé látky šířené vzduchem. Kombinace těchto škodlivin přispívá k degradaci nekovových materiálů a silné korozi kovů.

Písek, prach a sopečný popel

Každá z těchto složek se vyskytuje na mnoha místech, ale zejména pak v průmyslových oblastech, kde obsahují několik dehtových zplodin, popel a saze. Prach se také nachází v tropických pásmech s nízkým množstvím srážek. Písek a prach jsou extrémně problematické na pouštích, kde se suchý sypký písek a prach přenáší větrem. Během pouštních bouří mohou proniknout do utěsněného vybavení a mnoha vnitřních oblastí draku letounu. Ve vyprahlých krajinách, jako jsou pouště, jsou písečné částice větrem vyfouknuty až do výšky 3 km.

Písek, prach a sopečný popel jsou hygroskopické látky, které mohou na vnitřních nebo vnějších površích letadla, nebo jeho elektronických součástech, vstřebávat a udržovat vlhkost. Jejich přítomnost může také ovlivnit činnost elektrických kontaktů, zabránit správnému chodu rotujících zařízení pohonu motoru a způsobit poruchy indikačních přístrojů.

Prach ze sopečných oblastí obsahuje chloridy a sulfáty, které jsou v přítomnosti vlhkosti extrémně korozivní. I když malé množství písku nebo prachu může technický personál lehce přehlédnout, může to být dostatečná příčina pro vznik koroze.

Slunečné záření

Dvě nejvíce škodlivá pásma slunečního záření jsou ultrafialové světlo (v mezích, které způsobují spáleniny) a infračervené (oblast, která dodává slunečnímu záření teplo).

Na zemi se maximální záření vyskytuje v tropických a rovníkových pásmech, ale značné poškození vznikají v mírných podnebí, jako důsledek slunečního ohřevu, fotochemických efektů a kombinací těchto dvou jevů. Nekovy, a zvláště organické a syntetické materiály, jsou velice ovlivněny slunečním světlem. Přírodní i syntetická guma pod tímto světlem chátrá rychle. Plasty po dlouhém vystavení ztmavnou, nátěry ztratí své ochranné vlastnosti, polymerům se značně sníží pevnost a tuhost, a barvy blednou.

Podnebí

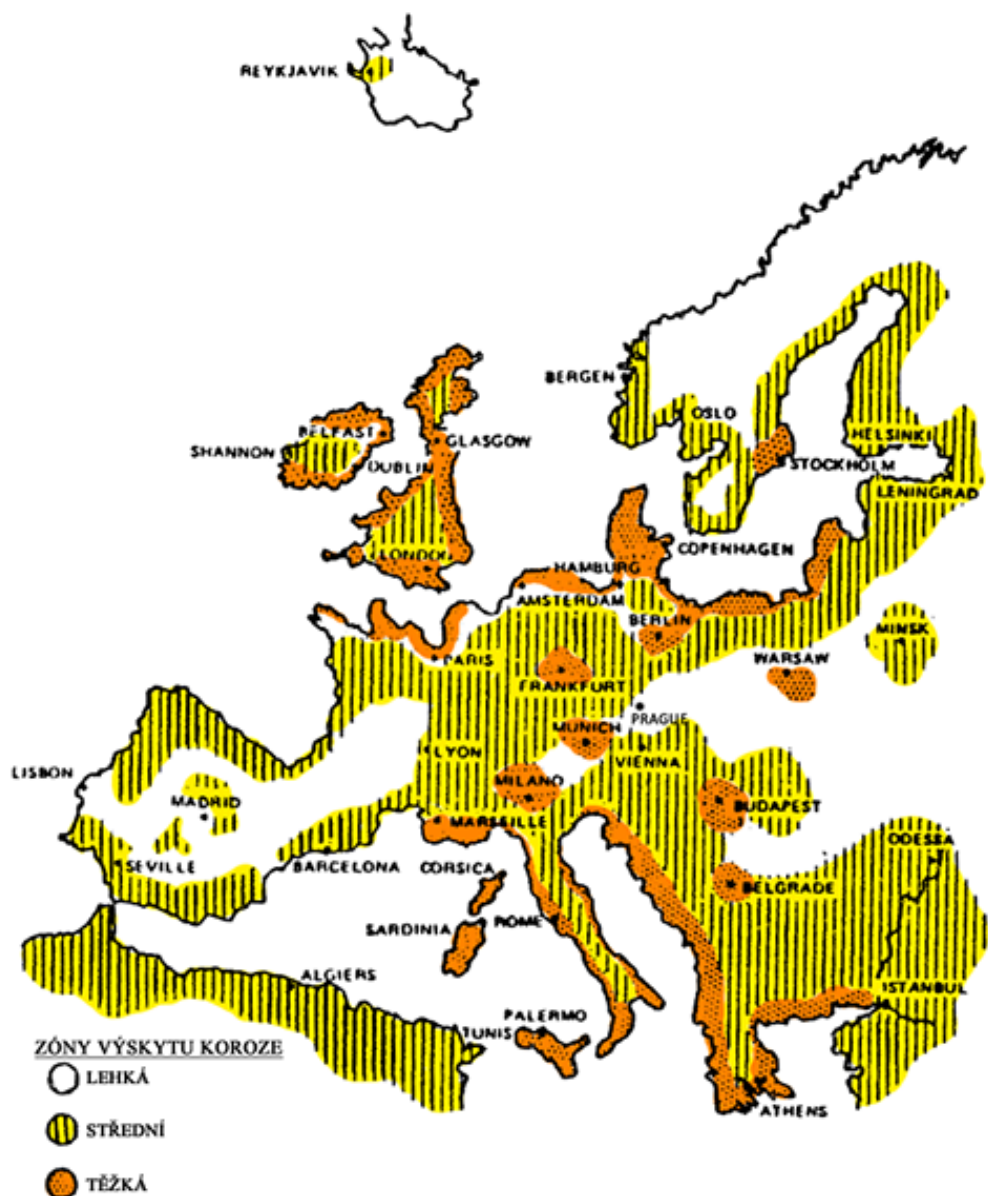
Samotné vyhodnocení environmentálních podmínek musí být provedeno lokálně provozovatelem. Prostředí je kombinací několika faktorů, některé z nich, které by se měly brát v úvahu, jsou uvedeny dále:

Poušť - Horké, větrné pouště přináší systému údržby závažné problémy, jelikož jemný prach může proniknout i do domněle těsných komponentů. Vysoké denní teploty, vlhkost (v oblastech jako Perský záliv), ultrafialové záření a jemný prach jsou čtyři z nejzávažnějších, destruktivních prvků pouštního podnebí. Nekovové materiály v těchto oblastech, kde teplota během dne může dosáhnout 51°C, zaznamenávají nejvíce škod. Teplota v uzavřených nádržích nebo nádobách může být i o 38°C vyšší, než vnější teplota vzduchu.

Mírná pásma - Pásma mírného podnebí zahrnují většinu Severní Ameriky a Evropu (jejíž korozivní prostředí je zobrazeno na *Obr. 11*). Tyto oblasti se mohou v různých ročních obdobích blížit extrémům polárních, pouštních nebo tropických teplot a vlhkostí. Teploty mírného pásma se mohou pohybovat od -32°C po 15°C v zimě a mezi 15°C a 52°C v létě. Nejkritičtější jsou přímořské oblasti během teplých období v roce, ve kterých vlhkost v noci dosahuje téměř 100 procent a vzduch má vysokou koncentraci soli. Vlhkost ze solí nasyceného vzduchu může během brzkých večerních a ranních hodin kondenzovat na vybavení, a tak způsobit závažnou korozi. Kvůli svým mírným teplotám jsou také mírná pásma nejvíce zalidněná. V důsledku se zde tedy vyskytují kouř, smog, ozón a korozivní dým, spjatý s rozšířeným průmyslem.

Tropické oblasti - I když zahrnují pouze malou část povrchu Země, tropy jsou nejnáročnější na údržbu z hlediska úpravy povrchů a kontroly koroze. Relativní vlhkosti až 100% při teplotách okolo 29°C a rosném bodě blížícím se 29°C představují imponující

hrozbu koroze. Pokud se podmínky vysoké vlhkosti a teploty spojí se solí nasyceným vzduchem, korozivní prostředí je extrémně náročné.



Obr. 11 - Korozní prostředí v Evropě

2. Výskyt, odstraňování a ošetřování koroze

Při odstraňování koroze je nejdůležitější její odstranění úplné. Pokud k tomuto nedojde, koroze se bude dále šířit. Například, pokud se objeví koroze kolem šroubu, je potřeba jej vyjmout a zkontrolovat oblast pod hlavou šroubu a v otvoru. Odstraňování koroze kolem takových šroubů bez jejich vyjmutí nezastaví korozi pod nimi.

Kapilární zkouška také vždy neodhalí, pokud byla z oblasti odstraněna všechna koroze, proto je potřeba je zkontrolovat i vizuálně. Z postižené oblasti také musí být odstraněna barva, olej nebo maz před ošetřováním samotné koroze.

Koroze může být odstraněna buď mechanicky, nebo chemicky.

2.1 Inspekce koroze

Regulérní program údržby by měl zahrnovat inspekci koroze následovanou správným ošetřením postihnutých oblastí. Letadlo by mělo být zkontrolováno nejen kvůli poškození samotnou korozí, ale také kvůli podmínkám, které korozi mohou způsobit (například poškozené úpravy povrchů nebo ucpání odtokových kanálů). Jelikož je koroze problém, který se sám nevyřeší, jsou doporučeny časté inspekce náchylných oblastí. V neobvyklých environmentálních podmínkách může být nutné frekvenci prohlídek zcela pozměnit.

Speciální podmínky

V případech, kdy se nakládá nestandardní náklad (např. ryby nebo dobytek) nebo dojde k rozlití škodlivých produktů (např. rtuti), postupuje se podle specifických požadavků pro inspekci.

Metody inspekce:

K odhalení a určení koroze se využívá vizuálních nebo nedestruktivní prohlídek (NDT). U vizuálních generálních prohlídek se často používají boroskopy, zvětšovací skla apod. Nedestruktivní techniky mají limitovanou schopnost detekce koroze, kvůli složitosti přístrojů a prohlížených oblastí, a časové náročnosti. Nedestruktivní metody se tedy používají ve specifických oblastech, kde není vizuální prohlídka možná, nebo kde se musí podrobněji vyhodnotit rozsah koroze. K inspekci těchto oblastí se mohou využívat následující nedestruktivní techniky, ačkoliv o jejich použití rozhoduje specialista NDT.

Vířivé proudy

Vířivých proudů se může využít k lokalizaci koroze v potahu, výztuhách a oblastech nosníků. Tato metoda se také používá ke zjištění, zda u viditelné koroze, výdutí potahu nebo povolení spojů došlo ke vzniku mikroskopických trhlin.

Ultrazvuk

Inspekce ultrazvukem je technika používaná pro detekci závad sendvičových konstrukcí včelí plástve nebo spojených panelů. Koroze může být určena ultrazvukovým měřením tloušťky panelu.

Radiografie

Rentgen je využíván k odhalení závad v oblastech nepřístupných pro vizuální inspekci bez větší demontáže. Tato metoda se také používá jako záloha pro jiné techniky NDT (např. při detekci vnitřní koroze v sendvičových panelech po její objevení ultrazvukovou metodou). Závažná koroze může být radiograficky detekována, pokud je ztráta kovu 20 nebo více procent z celkové tloušťky panelu.

Kapilární zkoušení

Využívá vlastnosti kapalin, které vtečou do defektu na povrchu součásti. Kapalina, zvaná penetrant, je aplikována na povrch a je jí umožněno vsáknutí. Nadbytečná tekutina je poté z povrchu odstraněna, ale část jí zůstane ve vadě. Nanese se tzv. vývojka, která nasaje penetrant z defektu a tím ho zviditelní. Viditelné penetranty se zkontrolují pod ultrafialovým světlem. Tato technika se také používá k detekci povrchové a mezikrystalické koroze.

Magnetické částice

Zkouška magnetickými částicemi se dá provádět pouze na materiálech s feromagnetickými vlastnostmi, většinou nízko slitinové oceli a nerezové oceli pro snášení vysoké teploty. Je to jemná nedestruktivní procedura k hledání prasklin a necelistvostí v povrchu a jeho blízkosti.

2.2 Oblasti náchylné ke korozi

U většiny letadel jsou oblasti nejčastějšího výskytu koroze obdobné. Tyto oblasti by se měly kontrolovat, čistit a ošetřovat častěji, než méně korozi náchylné oblasti.

Oblasti výfuku z motoru

Jak u proudového, tak u pístového motoru mohou být kvůli usazeninám po výfukových plynech tato místa velice korozivní. Je důležité zkontrolovat zejména místa spojů, mezer a pod aerodynamickými kryty, které je potřeba sundat.

Příhrady pro baterie a odvětrávací otvory

Navzdory systému ochranných nátěrů a značnému zatěsnění a zaopatřenému odvětrávání, bývají příhrady pro baterie, co se týče koroze, jedny z problematických míst. Výpary z přehřátých elektrolytů baterií je složité udržet pod kontrolou, a tak se šíří do vnitřní struktury. Nechráněné povrchy potom mohou být napadeny korozí. V těchto místech je důležité časté čištění a neutralizace nánosů kyselin, aby byla koroze minimalizována. Elektrolyty některých druhů baterií mohou při úniku také způsobit korozi (jde například o kyselinu sírovou nebo hydroxid draselný).

Toalety, bufety a kuchyňky

Zejména pak oblasti záchodků jsou jedním z nejčastějších míst výskytu koroze u větších dopravních letadel. Problematická místa mohou být za toaletami, dřezy a při výskytu zbytků jídla a odpadu, pokud tato místa nejsou udržována v čistotě. I když některé kontaminanty nemusí být korozivní samy o sobě, mohou přitahovat a vstřebávat vlhkost, která naopak korozi způsobí. Je doporučeno se při prohlídce soustředit na oblasti pod kuchyňkami a toaletami, pravidelně tato místa čistit a udržovat ochranné těsnicí látky a nátěry v dobrém stavu.

Spodní část trupu letounu

U všech letadel bývá tato oblast problematickým místem, zejména pak proto, že funguje jako přirozená jímka pro hydraulické tekutiny, vodu, špínu, uvolněné šrouby, třísky po vrtání a jiný odpad. Zbytkový olej často zamaskuje malé množství vody usazené pod ním, čímž může vzniknout riziko koroze.

Podvozek

Oblast podvozku je nejspíše ta nejvíce opotřebovávána, než jakákoli jiná část letadla. Je vystavena blátu, vodě, soli, šterku a jiným úlomkům z ranvejí během letových operací. Kola letadla a jejich okolí je potřeba pravidelně čistit, mazat a udržovat zde ochranné nátěry. Jelikož se podvozek skládá z mnoha součástí různého tvaru, bývá složité

ho celý pokryt ochrannými vrstvami a zejména je udržet v dobrém stavu. Navíc teplo vznikající při brzdění znemožňuje použití ochranných povlaků na určitých místech (jako okolí kol).

Oblasti vnějšího potahu

Vnější potah letadla je běžně pokryt ochrannými podkladovými nátěry. K tomu mohou být nanесeny i barevné povlaky. Napadené vnější povrchy jsou snadno viditelné a dostupné k inspekci i údržbě. V minulosti se na tyto oblasti kladl velký důraz, což vedlo k zavedení údržbových procedur. Ale i tady mohou některé konfigurace nebo kombinace materiálů vytvořit problém a je potřeba zvláštní pozornost, aby se zabránilo vážným korozním obtížím.

Například upevňovací prvky a jejich okolí bývají místa náchylná ke korozi. Do mezer v nátěrech mezi hlavou šroubu a potahem se může dostat vlhkost a způsobit mezikrystalickou korozi. K tomu samému může dojít i u přiléhajících povrchů a štěrbin. Tento typ koroze se většinou projevuje vyboulením potahu.

Místa zachycování vody

Jelikož koroze vzniká při nahromadění vlhkosti, specifikace konstrukce letounu většinou požaduje, aby byly ve všech místech hromadění vody nebo jiných tekutin nainstalovány nízké drenáže. Častokrát se stává, že jsou tyto drenáže neefektivní, buď kvůli umístění, nebo protože se zacpou těsnícími látkami, špínou, cizími součástkami a jiným odpadem. Potenciální místa svádění vody nejsou problém, pokud jsou správně umístěné drenáže funkční, a letadlo je na zemi v normální pozici. Nicméně, ucpání jen jediné drenážní díry nebo naklonění úrovně letadla může způsobit problémy s korozí, když se vody zachytí v některé z "vanových" oblastí. Je doporučena denní inspekce drenáží a těchto oblastí.

Přední oblasti motoru a průduchy chlazení

Neustálé odírání vzdušnými nečistotami a prachem, kamínky z ranvejí a deštěm mají sklon k odstraňování ochranných povrchů z těchto oblastí. U pístových motorů navíc části chladicí soustavy častokrát nesmí být natřeny. Místa připevnění motorových součástí mají většinou některá místa z nenatřeného hliníku nebo hořčíku. S vlhkostí, solí nebo průmyslovým znečištěním neustále proudícím přes tyto povrchy, se stávají hlavními místy

napadení korozí. Kontrola těchto oblastí by měla zahrnovat všechny sekce chladicí soustavy a místa nebo štěrby, kde by se mohla usadit sůl u přímořského provozu.

Prostory elektronického vybavení

Elektronické a elektrické oddělení chlazené vnějším nebo kompresním vzduchem mohou podléhat stejným problémům, jako oblasti motoru a jeho chlazení. I když zde neprochází tolik vzduchu a bývá zde konstrukční uspořádání, které zamezuje nahromadění vody v uzavřených oblastech, je i přesto důležité na tato místa dávat pozor.

Elektrické jističe, kontakty a přepínače jsou extrémně citlivé na vlhkost a korozi, takže by se měly pečlivě kontrolovat. Pokud je tomuto z konstrukčních důvodů zabráněno, když je soustava zapojena, inspekce se provádí po odstranění komponentů z jiných důvodů.

Jelikož běžné postupy při odstraňování koroze by mohly poškodit elektronické komponenty, měl by toto dělat jen kvalifikovaný personál se znalostmi o jejich funkčnosti a postupovat podle příslušných manuálů. Většina koroze vznikající na avionickém vybavení je podobná té vyskytující se na draku letadla. Rozdíl mezi nimi je ten, že i při malém množství koroze na avionickém vybavení může dojít k jeho degradaci nebo úplnému selhání, kdežto na větších strukturách by tato koroze mohla být přehlédnuta.

2.3 Korozní poškození a obráběcí limity

Po počáteční inspekci a čištění je potřeba vyhodnotit stav koroze, aby bylo možno určit způsob a rozsáhlost opravy. Je složité určit přesnou a specifickou hranici mezi jednotlivými stavy, takže je požadován dobrý úsudek údržby

Lehká koroze

Charakterizována ztrátou barvy nebo důlky do maximální hloubky přibližně 0,025 mm. Tento typ škod bývá běžně odstraněn lehkým ručním osmirkováním nebo minimálním chemickým ošetřením.

Střední koroze

Vypadá podobně, jako lehká koroze, s tím rozdílem, že se u ní mohou vyskytovat nějaké puchýřky nebo docházet k odlupování a oddrolení. Hloubka důlků může dosahovat až 0,254 mm. Tento typ poškození se odstraňuje extenzivním ručním nebo mechanickým smirkováním.

Těžká koroze

Vzhledem se může blížit střední korozi, se silným puchýřkovatěním a oprýskáváním. Důlky mají v tomto případě hloubku větší, než 0,254 mm. Poškození se odstraňuje rozsáhlým mechanickým smírkováním nebo broušením.

2.4 Praktiky ošetřování koroze

Proto, aby bylo zamezeno dalšímu výskytu koroze po jejím odstranění nebo opravě jejich škod, musí se odhalené plochy většiny kovů bezodkladně ošetřit. Tyto praktiky zahrnují konverzní nátěr, pokovování nebo aplikace tenkého ochranného filmu (jako může být olej nebo primer) na základní kov. Použití konverzního nátěru a primeru také zvyšuje adhezivní vlastnosti nátěru, pokud jsou potřeba. Některé kovy, jako nerezová ocel a titan, které jsou v podstatě korozi odolné, nepožadují povrchovou ochranu, krom nátěru shodným s okolní strukturou. U těchto kovů je plátování nebo zatěsnění důležité jen při jejich kontaktu s jinými kovy.

I když je pak koroze odstraněna a na povrchu byly provedeny konečné úpravy, čímž se snížila pravděpodobnost ke znovuobjevení koroze, bývá výhodné na náchylná místa na povrchu nanést i směs inhibitoru koroze.

Hliník a hliníkové slitiny

I když tyto materiály tvoří na svém povrchu při vystavení atmosférou neviditelný oxidový film, a tento film poskytuje ochranu proti korozi v mírných podmínkách, je u nich požadovaná další ochrana, i pro případ odstranění ochranného filmu obráběním.

Všechny obráběné hliníkové povrchy by měly být očištěny a měl by se na ně nanést konverzní povlak. Materiál povlaku chemicky převede hliníkový povrch na velice tenkou (méně než 2 μm) nekovovou chromátovou vrstvu jako součást kovu. Tento film je odolný proti korozi a také výborný adherent pro základní nátěr. Konverzní povlak může být nanesen alodováním nebo ošetřením iriditem.

Slitiny hořčíku

Tyto slitiny jsou vysoce náchylné ke korozi, pokud je povrch kovu odhalen a bez ochranného nátěru. Na povrchu odhalené slitiny hořčíku se sice vytváří oxido-karbonový film, ale ten poskytuje velice malou ochranu proti korozi. Proto je potřebný ochranný základní nátěr.

Všechny povrchy hořčíkové slitiny, které byly obráběny, se musí očistit a pokrýt konverzním povlakem. Materiál tohoto povlaku převede povrch slitiny hliníku na inhibiční pasivní vrstvu na základním kovu, která korozi odolává. Tento povlak se nanáší pomocí štětce.

Uhlíkové oceli

Odhalené povrchy uhlíkových ocelí jsou vysoce reaktivní při vystavení okolnímu prostředí. Tato ocel je po tepelném opracování plátována buď kadmiem, nebo kadmiem a titanem. Ocelové části během výroby a za provozu absorbují vodík. Toto vstřebávání vodíku může způsobit počátky prasklin a jejich rozšíření, což zapříčiňuje křehkost a lámání, pokud je část pod tahovým napětím. Náchylnost ocelových částí ke zkřehnutí se zvyšuje spolu s vyšší tuhostí a pevností.

Ocelové části tepelně upravené na 180 ksi (cca 1,2 GPa) a níže nejsou náchylné k vodíkovému křehnutí, ale části tepelně upravené na 220 ksi (1,5 GPa) a výše jsou k němu naopak vysoce náchylné a musí se plátovat. Proto, aby se předešlo použití konvenčního plátování, opracované povrchy všech částí z uhlíkové oceli musí být plátovány kadmiem speciálním procesem proti zkřehnutí oceli.

Nerezové oceli, slitiny niklu a chromu, titanové slitiny

Po opracování není potřeba žádného ošetřování těchto slitin.

3. Preventivní postupy a úpravy materiálů

3.1 Faktory regulování koroze

Korozivní činitele

Stupeň závažnosti, příčina a typ koroze závisí na mnoha faktorech. Může to být velikost nebo tloušťka části, materiál, tepelné zpracování materiálu, konečné ochranné úpravy, podmínky prostředí, preventivní opatření a konstrukce.

Thusté strukturální sekce jsou obecně více náchylné ke korozi, kvůli odlišnostem v jejich složení, zejména pokud jsou sekce při výrobě tepelně zpracovávány. Když jsou velké sekce obráběny nebo chemicky opracovány po tepelném zpracování, mohou být korozní charakteristiky tenčích sekcí odlišné od silnějších oblastí. Velikost sekce je založena na strukturálních požadavcích a není možné ji změnit pro potřeby regulování koroze. Z hlediska údržby je správný přístup uvědomit si potřebu zajištění integrity a pevnosti hlavních strukturálních částí, a udržovat v těchto oblastech trvalou ochranu.

Servisních zatížení a opravy v terénu mohou ovlivnit množství výskytu a typ koroze. Struktury letadel pod vysokým střídavým namáháním jsou zejména vystaveny korozi za napětí. Také oblasti přilehlé přivařovaným částem často vykazují korozi, kvůli nedostatečnému odstranění svařovacích tavidel nebo, u některých ocelí, vytvoření magnetického pole. Takovéto oblasti by měly být pečlivě kontrolovány pro stopy koroze, a pokud je nějaká objevena, je zapotřebí správného ošetření.

Regulace koroze při návrhu konstrukce

Jelikož je koroze degradace kovů způsobena reakcemi mezi kovy a jejich okolním prostředím, určité plány regulace koroze nebo způsoby jejího minimalizování po vypuštění letounu do provozu by se měly předložit již během počátečních fází návrhu konstrukce.

Materiálové vlastnosti jsou základním faktorem při korozi. Vysokopevnostní, tepelně upravitelné slitiny hliníku a hořčíku jsou vysoce náchylné ke korozi, naproti tomu titan a některé nerezové slitiny oceli jsou v atmosférickém prostředí náchylné méně. Výrobce letadel volí materiály pro letadlo podle jejich pevnosti, hmotnosti a ceně, zatímco korozní odolnost je často až na druhém místě. Nicméně, regulace koroze by se měla brát v úvahu co nejdříve během předběžné návrhové fáze.

Použití více korozi-odolných materiálů v jakékoli konstrukci běžně znamená zvýšení hmotnosti, aby se zachovala potřebná pevnost. Jelikož hmotnostní činitel je klíčovým faktorem v konstrukci draků letounu, je hlavní způsob prevence proti korozi založen na používání ochranných povlaků a správných údržbových postupech.

Použitím korozi-odolných slitin se nezaručí všestranná a kompletní ochrana proti korozi. Častou chybou je výměna zkorodované části za korozi-odolnou slitinu s tím výsledkem, že se později odhalí prostup koroze do části jiné, kde navíc došlo k jejímu zhoršení.

Problém ochrany proti korozi je zmírněn, jestliže je materiál, který je potřeba chránit, skutečně proti korozi odolný. Hliníkovo-měděné slitiny jsou známé pro svou zvýšenou odolnost proti korozi za napětí a lepšími únavovými vlastnostmi, než hliníkovo-zinkové slitiny. Proto se často používají jako hlavní strukturní materiál.

Jelikož je galvanická koroze způsobená odlišnými kovy, které jsou navzájem v kontaktu, důležitým faktorem, který by se při opravě letadla neměl opomíjet, jsou údaje v galvanické tabulce pro kovy a slitiny. Čím jsou v téhle tabulce od sebe uvedené kovy dále, tím je větší riziko galvanické koroze. Materiály, které jsou v ní pohromadě, mají malý rozdíl v elektrických potenciálech, a proto je relativně bezpečné je používat v kontaktu se sebou navzájem. Při spárování kovů z různých skupin dojde ke korozi té, která má nižší činitel potenciálu.

3.2 Předběžné úpravy povrchu

Korozní odolnost a stálost kovových materiálů, ale i jejich ochranných, vzhledových a funkčních povlaků je mimo jiné závislá na čistotě a struktuře základního kovu. Proto se povrch předem upravuje a čistí. Jeho kvalitní příprava je nezbytným předpokladem celého technologického postupu úpravy povrchů a jedním z faktorů ovlivňujících životnost povlaků.

Požadavky na stav a čistotu kovů závisí na druhu jejich plánované úpravy. Vysoká čistota povrchů je například požadována u smaltování nebo pokovování z vodných roztoků. Nutnost čistoty vyplývá jak z toho, že nečistoty na povrchu kovu mohou zabránit jeho přímému styku s lázní a tím znesnadnit průběh vylučování povlaku, tak z rizika, že tyto nečistoty mohou snížit přilnavost vylučovaného povlaku. Přilnavost většiny povlaků totiž závisí na působení adhezních sil na povrchových molekulách základního kovu. Tyto síly působí pouze na malou vzdálenost (do 5 nm), proto každá

sebumenší vrstva nečistot oddaluje povlak od základního kovu, a tím snižuje adhezi a následnou přilnavost povlaku.

Ačkoli u některých druhů povrchových úprav (například povlaky konzervačních olejů a tuků, anorganické konverzní povlaky nebo fosfátové, chromátové a oxidové vrstvy) není dokonalá čistota nutností, přesto i u těchto technologií je vliv předběžných úprav na životnost a odolnost vůči korozi veliký.

Vyskytující-se nečistoty mohou být cizí (ulpělé) nebo vlastní, přičemž ulpělé nečistoty jsou k povrchu vázány pouze adhezními silami. Jedná se hlavně o zbytky mastných látek, kovové nečistoty a nerozpustné anorganické nečistoty. Nečistoty vlastní jsou k povrchu vázány chemickou vazbou. Jedná se o takzvané korozivní zplodiny, které na povrchu kovu vznikají chemickou přeměnou kovu při reakci s prostředím. Může se jednat například o rez nebo okuje.

3.3 Plátování

Během procesu plátování se spojuje vyválnovaný ochranný materiál (většinou ve tvaru plechu) se základním materiálem určeným k vyválnování. Na konečnou tloušťku se oba materiály válcují již ve spojeném stavu. Plátováním se může jednostranně nebo oboustranně nanést 5 - 10 % tloušťky základního materiálu, což je vrstva znatelně tlustší, než nanášení jiným způsobem. Po pevnostní stránce je jakost ochranné vrstvy daleko lepší, než u amorfního materiálu, takže je možné vystavit plátovaný plech vyšším nárokům, než plech pokovovaný jiným způsobem.

3.4 Kovové povlaky

Kovové povlaky jsou jako prostředek úpravy povrchu velice rozšířené. Můžou plnit funkci ochrannou, ale i ozdobnou, a mohou povrchu dodávat i další vlastnosti (např. tření, odolnost proti jiným vnějším vlivům).

Jejich vlastnosti jsou závislé na druhu povlakového a podkladového materiálu, jejich tloušťce a způsobu vytváření vrstvy. Je tedy důležité zvolit vhodný povlakový materiál, ale i metodu jeho nanášení.

Ochranná funkce těchto povlaků spočívá v antikoročním legování, katodické ochraně a bariérové ochraně povrchu. Vytvořením difuzní vrstvy se povrch obohatí o legující prvek. S použitím ušlechtilého kovu je počátek anodického rozpouštění povrchové slitiny kladný, takže její korozní rychlost je menší.

Hodnocení ochranné funkce povlaku se hodnotí zejména z hlediska tloušťky a poréznosti. S tloušťkou roste i životnost povlaku, jelikož se snižuje počet korozně významných pórů. V ideálním případě by byl povlak zcela neporézní. Koroze těchto povlaků se v podstatě rovná korozi kompaktnějších kovů o tloušťce povlaku.

3.5 Konverzní povlaky

Jsou to uměle vytvořené vrstvy oxidů, fosforečnanů a chromanů kovů. Na nelegovaných ocelích se oxidové vrstvy vytvářejí chemickou oxidací nebo oxidací za zvýšené teploty. Na hliníku a jeho slitinách (popřípadě jiných lehkých kovech) se tvoří chemickou a elektrochemickou oxidací. Oxidové vrstvy mohou být speciálně barveny nebo utěšňovány oleji a jejich tloušťka se většinou pohybuje od 1 do 30 μm .

Fosfátové vrstvy vznikají reakcí kovu s fosfáty nebo kyselinou fosforečnou a jejich tloušťka sahá od 0,1 po 10 μm , podle použití.

Pro hliník, měď, zinek, kadmium, hořčík a jiné se používají nejčastěji chromátové nebo oxidové vrstvy. Chromátové vrstvy jsou relativně odolné, při jejich nepórovitosti chrání podklad bariérovým způsobem a porušené ho chrání inhibičním účinkem podkladu chromanu. Oxidové vrstvy mohou být tvořeny anodickou oxidací (mohou odolávat agresivním atmosférám) nebo chemicky vzniklé, které mají nižší ochrannou účinnost, ale jsou levnější.

3.6 Korozi-preventivní sloučeniny

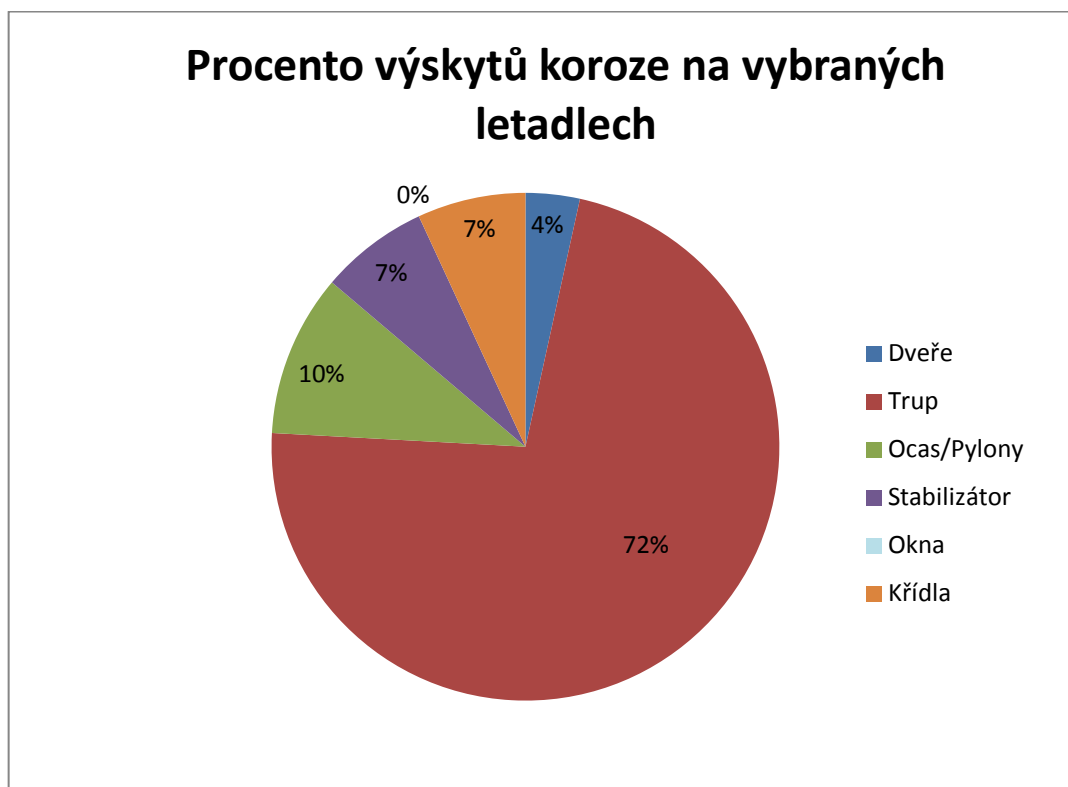
Tyto sloučeniny se v leteckém průmyslu používají již mnoho let, jako způsob ochrany proti korozi. Tato ošetření jsou často doporučena výrobcem v údržbových manuálech a pomáhají předcházet propuknutí koroze na specifických oblastech letadla. Tyto sloučeniny ale nejsou používány všude, kvůli své omezené životnosti, a proto se koroze přesto objevuje.

Těchto sloučenin existuje široká škála, ať už se jedná o látky odpuzující vodu nebo ty vytvářející pevnou ochrannou vrstvu. Přestože je jejich přesné složení utajováno, mohou obsahovat např. olej, mazivo, pryskyřici, různá hydrofobní aditiva, korozní inhibitory atd. Vodu odpuzující sloučeniny se roztékají po povrchu a zatékají do prasklin, ze kterých vypudí případnou vlhkost a zanechají látku, která zabraňuje další vodě ke vniku. Pevné filmy z těchto roztoků zaschnou do voskové nebo tvrdé podoby, jako některé nátěry, a vytvoří ochrannou vrstvu proti koroznímu prostředí.

4. Analýza výskytu koroze

Ze záznamů Dent&Buckle poskytnutých firmou JOB AIR Technic mi bylo umožněno sestavit statistiku výskytu koroze na strukturálních částech letounů, které zde v minulém roce prošly revizí. Jedná se o patnáct letadel typu B737-500 a B737-800 od různých provozovatelů a jejich záznamy obsahují korozní nálezy i z předchozích revizí.

V prvním grafu (*Graf č. 1*) jsou znázorněny případy objevené koroze na různých strukturálních částech letounu. Je z něj zřejmé, že oblast se zdaleka nejvyšším počtem výskytů koroze je trup letadla, a to s celkem 21 případy, zatímco na okenních konstrukcích se v žádném z letadel nevyskytla ani jednou. Na ocasu a pylonech byly nalezeny 3, na stabilizátoru a křídlech po 2, a dveřích jen 1 případ koroze.



Graf č. 1

Druhý graf (*Graf č. 2*) ukazuje počet korozních nálezů podle roku výroby letadla. I když se jednalo pouze o 15 letadel, poukazuje na to, že stáří letadla není nejdůležitějším faktorem při výskytu koroze, nýbrž záleží zejména na důkladné údržbě a provozních podmínkách letadel.



Graf č. 2

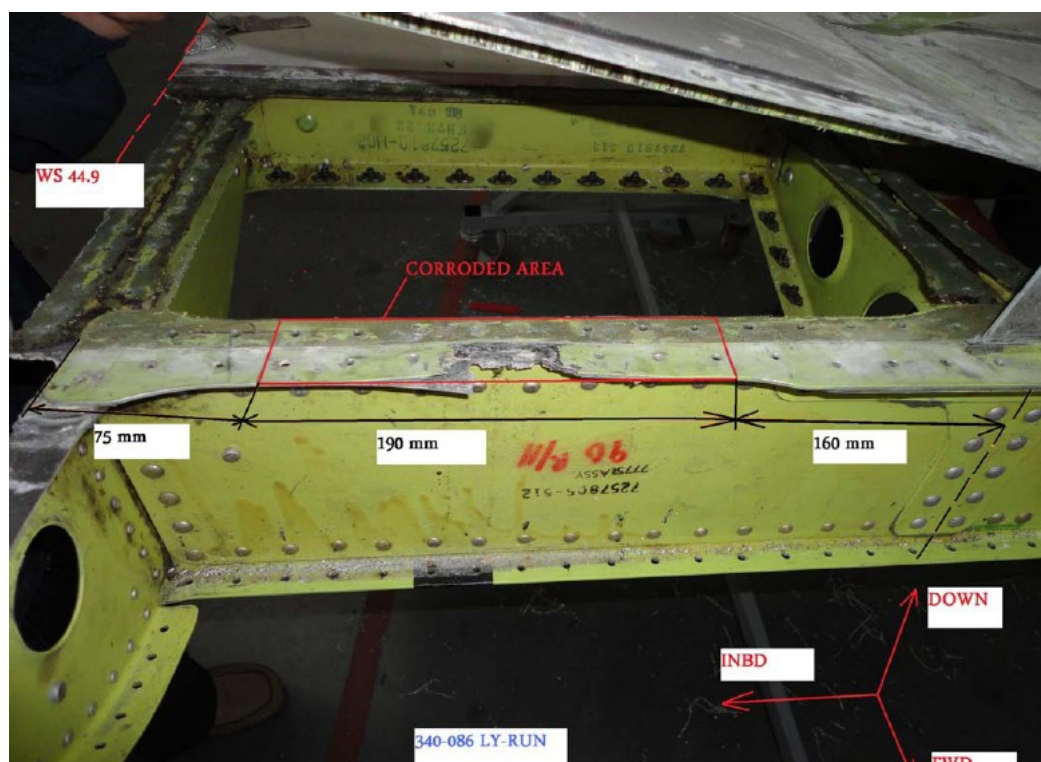
5. Postupy při nálezu koroze

Koroze a jiné strukturální poškození mohou vyhodnocovat a následně opravovat pouze certifikované firmy, které k tomu mají kvalifikovaný personál, potřebné přípravky a nářadí, a schválenou dokumentaci.

Jako dokumentace může sloužit SRM, CMM nebo AMM. V určitých případech se pro změny v postupech a nařízeních vydávají servisní bulletiny.

Pokud je ale řešení strukturálního problému nad rámec výše uvedených dokumentů, a žádné opravy nebo limity nejsou pro konkrétní problém popsány, je potřeba kontaktovat výrobce letadla. Ten, pokud je to možné, po konzultaci vydá instrukce pro řešení konkrétního případu daného letadla. Pro opravy nejčastějších míst výskytu koroze jsou již konkrétní případy uvedeny například v SRM.

Následující případ je jeden z těch, pro které v dokumentaci nebyl sepsán postup opravy, a proto muselo dojít ke kontaktování výrobce. Jednalo se o korozi oprýskávání na vnitřní konstrukci klapky letadla SAAB 340. Po zdokumentování situace se fotografie (jedna z nich viz *Obr. 12*) a popis poškození odeslal výrobcí, který poté odpověděl s tím, jakou část je potřeba vyříznout, jaké materiály použít a poskytl popsanou proceduru opravy.



Obr. 12 - Objevená koroze na křídle

6. Investice do antikoroziního vybavení

Jeden z relativně často se vyskytujících případů koroze na letadlech typu Boeing 737 je koroze na fittingu (uchycení) hlavního podvozku k zadnímu podélníku křídla.

Jen za rok 2011 se ve firmě JOB AIR provedly výměny pěti podvozků B737 NG, které měly kolem 10 000 FC. Z tohoto počtu byla při výměně Trunnion Support Fittingu (uchycovacího čepu) u dvou letadel objevena koroze.

Společnost Boeing vydala SB-737-57-1310, jenž je doporučen pro letadla dosahující celkového počtu 21 000 FC nebo věku deseti let. Je v něm zdůvodněn i vznik koroze. Jedná se o důsledek kontaktu ocelové podložky bez kadmiování povrchu s fittingem za vlivu okolního prostředí, zejména pak vlhkosti. SB se skládá ze tří částí: kontroly, prevence a opravy.

Kontrola

Kontrola se provádí u vnějšího povrchu fittingu, kolem děr pro čep. Pokud není žádná koroze nalezena, je doporučeno instalovat čep s novou podložkou s kadmiovaným povrchem. V případě, že se koroze objeví na vnějším povrchu, je dalším postupem demontáž pouzdra, v němž je čep uchycen, a kontrola, zda není koroze také na vnitřním průměru díry.

Oprava

Případná oprava se provádí podle SRM. Pokud se koroze vyskytuje pouze na vnějším čele fittingu, pak se toto místo vystruží a ubírá se materiál do hloubky max. 5,3 mm. Dále se instaluje pouzdro o stejném vnějším a vnitřním průměru, jako to předchozí, pouze se zkrátí na délku. Odebraný materiál se nahradí podložkou.

Pokud je koroze nalezena i na vnitřním průměru díry, potom se díra musí vystružit na vnější průměr, podle limitu v SRM. Poté se musí vytvořit pouzdro nové, a to přímo na míru nové díře, tedy se stejným vnitřním průměrem, ale větším vnějším průměrem, než mělo to předchozí.

Pro opravu jsou nezbytné speciální přípravky na odstranění koroze z čela fittingu, kde je zapotřebí zachovat kolmost vystružení. Při zvětšování průměru díry je hlavním požadavkem přesné zachování souososti mezi dvěma protějšími dírami.

V případě, že je koroze mimo limity SRM, je nutné fitting vyměnit, což může znamenat nejméně týdenní zpoždění revize. Jelikož je fitting přichycen k zadnímu podélníku křídla, probíhá jeho demontáž nebo montáž přes palivovou nádrž.

Přípravky:

Hlavní přípravek (viz *Obr. 13*) pro vystružení na čele fittingu se používá speciálně pro tuto opravu a jeho cena se pohybuje kolem 47 000 EURO, což činí 1,2 miliony Kč.

V případě nálezu koroze na vnější části díry se pro její stružení používá další přípravek, který firma Boeing dodává v sadě Special Tooling Kit.



Obr. 13 - Ilustrativní obrázek přípravku

Současný stav

Jelikož firma JOB AIR Technic v současné době nedisponuje potřebnými speciálními přípravky na obrábění fittingu, využívá k provedení této práce externí leteckou firmu. Ta vyšle pracovníka s daným náčiním, který si za provedenou práci účtuje přibližně 5 000 EURO (130 000 Kč). Přičemž v případě výskytu koroze v díře by byla cena vyšší.

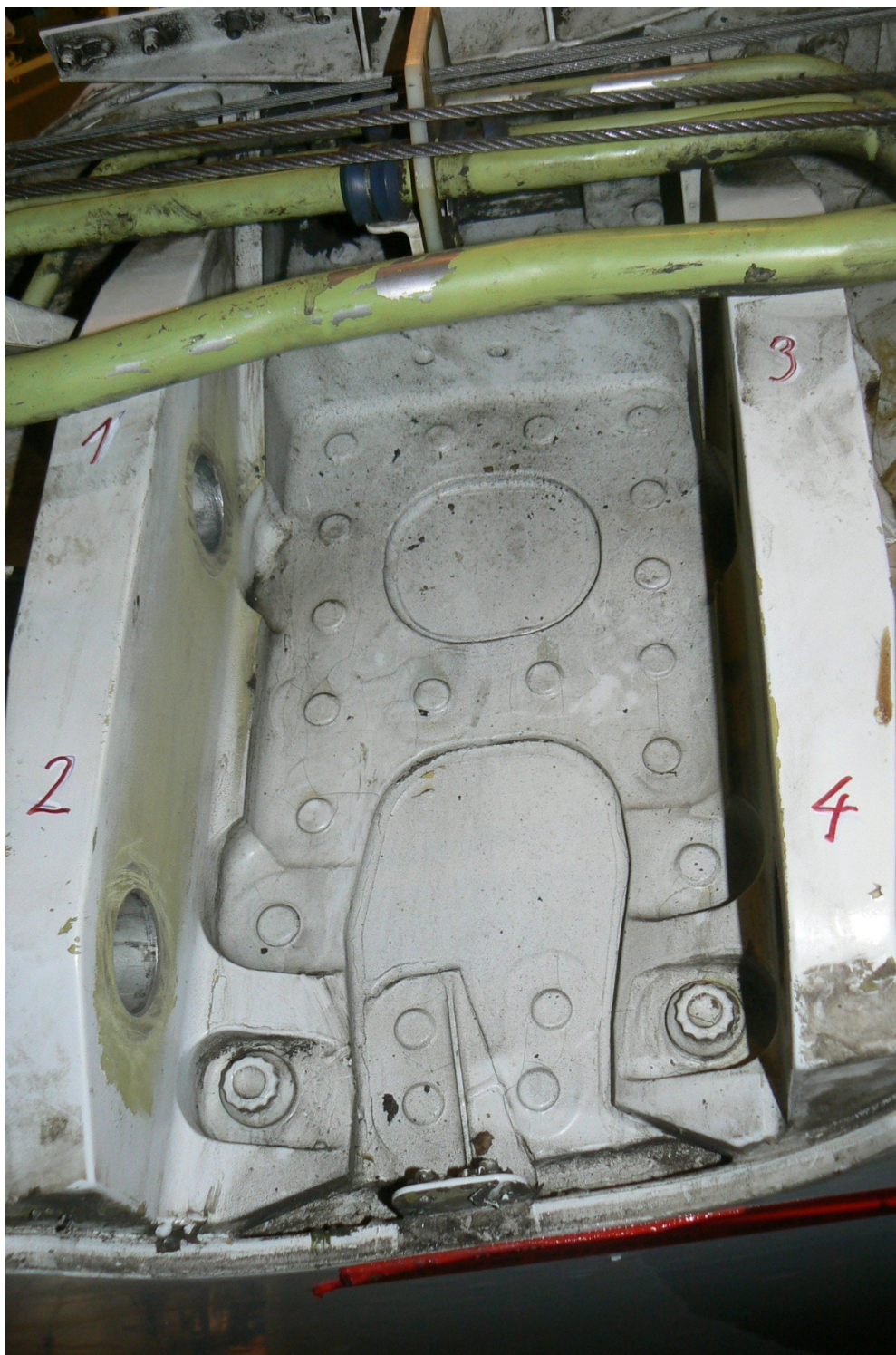
Výhodou tohoto řešení je, že není potřeba žádné počáteční investice do speciálních přípravků. Naopak nevýhodou může být, že jsou zaměstnanci závislí na dostupnosti služeb externí firmy, což může vést k odsunutí termínu pro skončení prací.

S ohledem na zvýšený objem revizí, výměn podvozků u B737 NG v následujícím období a častý nález koroze na uvedeném místě by bylo výhodné, aby JOB AIR Technic investoval finanční prostředky do pořízení vlastních speciálních přípravků, díky čemuž by byl schopen provádět tyto opravy nezávisle na subdodavatelích. Hlavní výhodou by tedy byla časová flexibilita a dostupnost provedení opravy.

Návratnost počáteční investice je odhadována do 10 oprav.



Obr. 14. - Detail fittingu s korozí



Obr. 15 - Konstrukce fittingu na zadním podélníku

Zhodnocení cíle bakalářské práce

Hlavním záměrem této bakalářské práce bylo získat přehled o problematice koroze v letectví a způsobech jejího ošetřování zejména z pohledu údržby. Byla představena i analýza z reálného prostředí, osvětlen problém konkrétní letecké společnosti a jeho řešení, což dohromady splňuje zadaný cíl.

Závěr

Přestože je koroze viděna jako dlouhodobý proces, při kterém dochází k poškození materiálu, některé její druhy mohou naopak nastat velice rychle, během několika dní nebo i hodin, a to s katastrofickými účinky.

Proto je důležité tento proces nepodceňovat a důkladně dodržovat již zavedené postupy ať už preventivních úprav materiálů, ošetřování povrchů, ale pokud možno i brát ohled na případné problémy již při návrhu letadla.

Mým názorem je, že hlavní důraz by se měl dávat údržbě a inspekci letadel, aby se zabránilo šíření koroze. I když není možné jí zcela předejít, do budoucna by bylo rozumné rozšířenější používání nejnovějších, ale i již osvědčených, antikorozních sloučenin na místech známého projevu koroze pro znatelné snížení rizika jejího výskytu. Pokud by se dále kontroloval stav ochranných látek a povrchových úprav, byla by ochrana povrchů téměř dokonalá.